

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.005

长江经济带典型污水收集系统提质增效量化研究

谢家强, 胡军, 颜莹莹, 孙娇娇, 吴坤明, 张雨晨, 雷轰,
巫坚, 赵骏

(长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 提质增效是城市污水收集系统查漏补缺、提高污水处理厂进水COD浓度、改善运行效能的重要举措。为此,基于城市水系统模型(MIKE+)形成了一套构建城市污水收集系统水动力、水质量化模拟分析的技术方法,并以长江经济带典型污水收集系统为例,建立污水收集系统模型,量化模拟分析了污水提质增效措施对污水处理厂进水COD浓度的改善效果。实践表明,该方法具备可复制推广性。

关键词: 污水收集系统; 提质增效; 量化评估; 长江经济带

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0028-07

Quantification of Quality and Efficiency Improvement of Typical Urban Sewage Collection System in Yangtze River Economic Belt

XIE Jia-qiang, HU Jun, YAN Ying-ying, SUN Jiao-jiao, WU Kun-ming,
ZHANG Yu-chen, LEI Hong, WU Jian, ZHAO Jun
(Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Improving quality and efficiency is an important measure to fill up the gaps of urban sewage collection system, increase the influent COD of sewage treatment plant and improve the operational efficiency. This paper proposed a set of technical methods for establishing quantitative models of hydrodynamics and water quality of urban sewage collection system based on the urban water system model MIKE+. The model of a typical sewage collection system in the Yangtze River economic belt was established, and the improvement effect of sewage quality and efficiency improving measures on influent COD of the sewage treatment plant was quantitatively simulated and analyzed. The practice showed that the method had application potential.

Key words: sewage collection system; quality and efficiency improvement; quantitative assessment; Yangtze River economic belt

城市污水收集系统是一个规模庞大、结构复杂的地下网络系统,包括污水管网、合流管网等。完善的污水收集系统是保障城市高效率、高质量运转的必要条件。然而传统的“重地上,轻地下”的城市发展模式,导致收集系统建设落后、欠账严重,不但引发了黑臭水体、水体富营养化、藻类暴发等问题,还

导致污水收集与处理设施的运行效能不佳^[1]。长江沿线6省191座污水处理厂进水BOD₅浓度的统计结果表明,进水BOD₅浓度整体偏低,均值约为62.9 mg/L,且低于100 mg/L的占比为88.6%;各省污水厂平均进水BOD₅浓度为58.0~74.7 mg/L,均远低于100 mg/L^[2]。长江沿线污水厂BOD₅偏低的主要原因

包括^[3-4]:①管网本底质量较差,导致外水入侵普遍严重,如管网上游山水汇入、下游沿河管网河水倒灌、管道老旧破损导致的地下水入渗等;②污染物在污水管网长距离输送过程中存在一定的生化降解;③污水管网悬浮颗粒物沉积携带较多的有机物沉淀;④源头小区纳管排放污水BOD₅浓度偏低等。污水处理设施也因进水BOD₅浓度不高,使运行效能持续处于低水平状态。

2019年,三部委联合印发了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》,坚持以排水管网为导向,加快推进生活污水收集处理设施的改造和建设,补齐城镇污水收集和处理设施短板,实施管网混错接改造、管网更新、破损修复改造等,实现污水管网全覆盖、污水全收集、收集全处理,全面提升现有城市生活污水收集设施的运行效能。

城市排水模型为污水收集系统提质增效目标可达性的量化评估分析提供了重要的科学手段。通过数值表达式描述污水、污染物从源头产生,管网输移到末端排放(或处理)全过程中发生的物理、化学及生物反应,不仅可以模拟污水、污染物在整个收集系统中的动态变化过程,而且可以有效“捕捉”污水、污染物的时空分布规律。笔者基于城市排水系统模型软件MIKE+,探索了一套用于构建污水收集系统量化模型的技术方法,并以长江流域典型城市污水收集系统为例,量化模拟分析管网雨污分流、排口截污改造、管道修复等污水提质增效方案的工程效果,旨在为类似的研究工作与工程实践提供参考。

1 量化评估方法

污水收集系统量化模拟评估是基于DHI China研发的城市水模拟软件MIKE+,构建城市污水收集系统水动力、水质模型,动态模拟分析从源头污染物产生,经污水管网收集,到进入污水厂全过程的空间输移及降解反应过程,其中主要包括污水管网一维水动力模型和水质模型。

1.1 管网水动力模型

污水管网水动力模型用于模拟水流在管网中的动态输移过程,控制方程为一维圣维南方程组,具体见式(1)。由于排水管道尺寸、坡度、流量等因素的变化,管道中水流常处于有压流与明渠流交替变化的渐变非恒定流状态,因此选用动力波计算路径进

行求解,方程组的离散采用Abbott六点隐式差分法。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha \frac{Q^2}{\partial x} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(I_f - I_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为管道流量, m^3/s ; q 为管道侧向输入流量, m^3/s ; A 为管道过水断面面积, m^2 ; y 为管道水深, m ; g 为重力加速度, m^2/s^2 ; t 为管道水流的流行时间, s ; x 为管道沿水流方向流行 t 时间的距离, m ; α 为动量修正系数; I_f 为管道水力坡度; I_0 为管底坡度。

1.2 管网水质模型

① 管网污染物输移模型

污染物进入排水管网后的存在形式主要为溶解态和悬浮态。在管网水动力模型基础上,污染物在管道中的输移过程可通过一维对流-扩散方程组进行模拟,见式(2),包括水流速度梯度产生的对流输移过程与污染物浓度梯度产生的扩散(分子扩散、紊流扩散)输移过程。对流-扩散模型中常采用对流扩散系数表示所有的扩散作用,扩散系数可表示为关于速度的指数函数式,见式(3),经验表明扩散系数的取值范围为 $1\sim 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

$$\begin{cases} \frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} = -A \cdot K \cdot C + C_s \cdot q \\ \frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -A \cdot K \cdot C + C_s \cdot q \end{cases} \quad (2)$$

$$D = a \times |u|^b \quad (3)$$

式中: C 为污染物浓度, mg/L ; A 为管道过水断面面积, m^2 ; K 为污染物一级降解反应系数, s^{-1} ; D 为扩散系数, m^2/s ; C_s 为污染物源项浓度, mg/L ; q 为侧向输入流量, m^3/s ; x 为沿管道水流方向的长度, m ; t 为输移时间, s ; T 为污染物单位时间输移质量, mg/s ; a 为扩散因子; u 为流速, m/s ; b 为无量纲指数。

② 管网污染物降解模型

污水在管网中的水力停留时间超过 $1\sim 2 \text{ h}$ 或管道输送距离达到 5 km 以上时,则需要考虑有机物生物化学降解反应。基于对流扩散方程适用的假设条件,污染物在管网中的生化降解过程可采用完全混合一阶降解反应方程进行表达,见式(4)。

$$\frac{d(VC)}{dt} = \frac{V \cdot dC}{dt} + \frac{C \cdot dV}{dt} = Q_i \cdot C_i - Q_e \cdot C_e - K \cdot C_e \cdot V \pm L \quad (4)$$

式中： $d(VC)/dt$ 为管道内单位时间污染物降解变化量； Q_i 为管道上游入流流量， m^3/s ； Q_e 为管道下游出流流量， m^3/s ； C_i 为管道上游污染物入流浓度， kg/m^3 ； C_e 为管道下游污染物出流浓度， kg/m^3 ； V 为管道中污水的体积， m^3 ； L 为污染物源汇项， kg/s ； K 为污染物降解系数， s^{-1} 。

1.3 量化评估技术方法

基于城市排水系统模型软件，构建污水收集系统模型并进行量化评估分析的全过程技术方法，如图 1 所示。

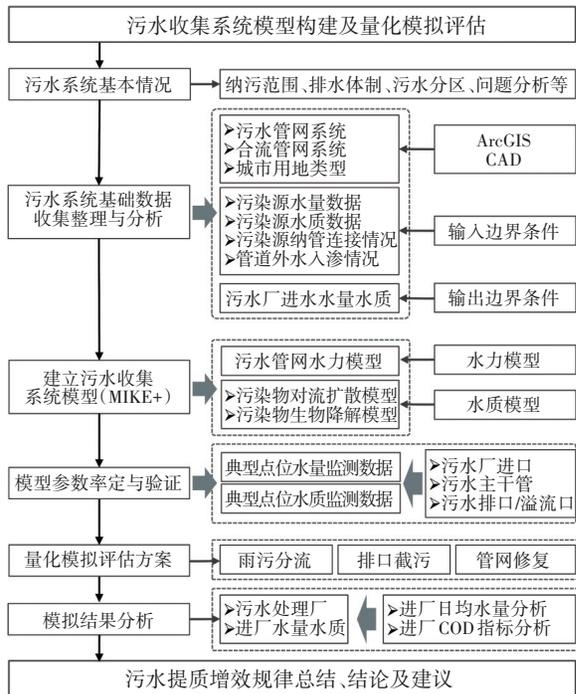


图 1 污水收集系统模型构建及量化模拟评估技术方法

Fig.1 Technical framework for sewerage system modeling and evaluating quantitatively

2 模型构建

2.1 案例概况

CZ 是位于长江流域某一级水系上游的山地城市，属于亚热带湿润季风气候区，地势高程自南向北变化较大。该城市中心城区总面积约为 102.24 km^2 ，包括第一、二、四污水收集处理系统，如图 2 所示。其中，第一、四污水收集系统无明显分界线，为老城区合流制与分流制共存的“混合型”系统，市政污水收集管网总长度约为 386 km，污水管、合流管占比分别为 56.7%、43.3%；第二污水收集处理系统为新建城区分流制系统，市政污水收集管网总长度约为 66 km。总体上 CZ 中心城区污水收集管网建

设年代较早，管道结构、功能缺陷问题严重，河水倒灌、地下水入渗、山泉水入侵、沿河截污管网高水位运行、管网错混接、污水直排，导致污水厂进水 COD 浓度较低，污水处理效能不佳，为长江经济带城市污水收集系统的典型常见病。

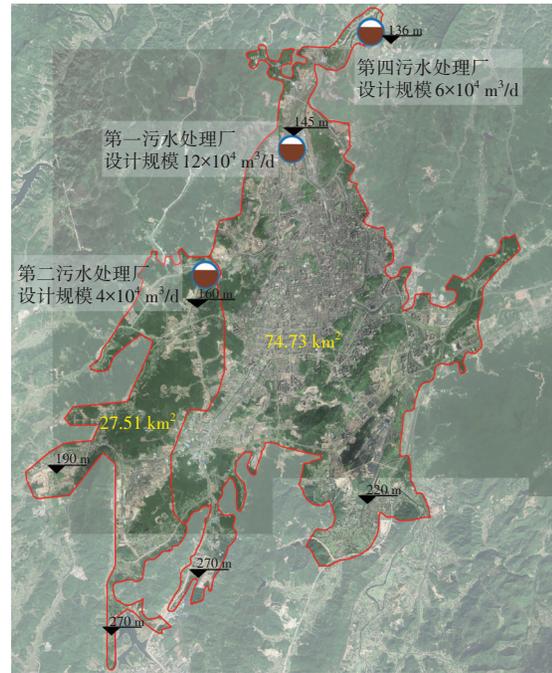


图 2 污水厂纳污范围

Fig.2 Service scope of sewage treatment plants

2.2 数据收集

① 污水管网数据

对第一、二、四污水处理厂纳污范围的现状污水管网与合流管网进行梳理，如图 3 所示。

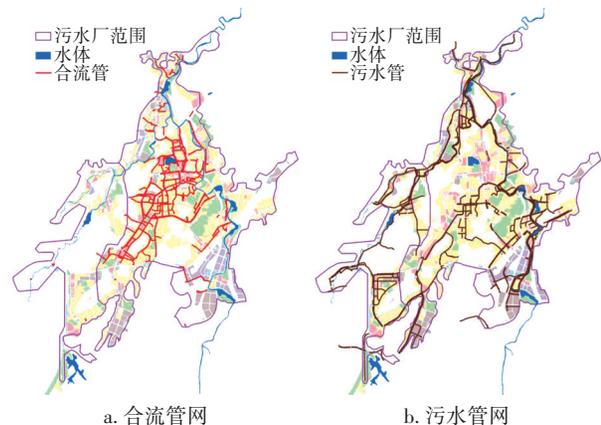


图 3 合流管网和污水管网分布

Fig.3 Distribution of combined pipe network and sewerage pipe network

通过 ArcGIS 软件对管网的属性数据进行规范

标准化处理,存储在相应图层的属性列表中。检查井节点共 13 732 个,污水管和合流管共 13 768 段,管道总长度为 452 km,排水口为 86 个。

② 污染源数据

以纳污范围内各类生活生产污染源的日均污水量与纳管水质数据作为污水收集系统模型中污染源水量、水质的输入边界。通常由于污染源类型多、数据量大,无法准确获取各污染源的水量、水质数据。根据现状不同用地类型的用水量指标测算污染源污水量,并通过 ArcGIS 快速生成点状污染源 1 533 个,如图 4 所示。

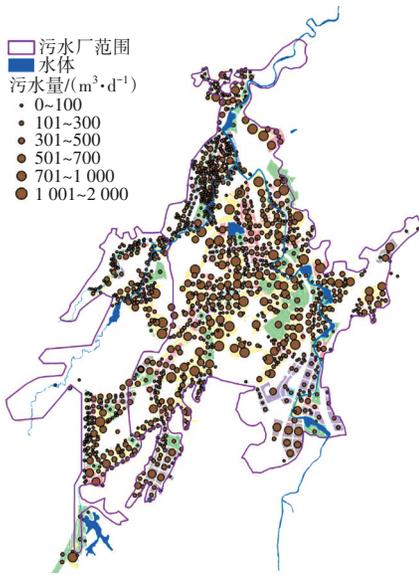


图 4 污染源分布

Fig.4 Distribution of different pollution sources

筛选典型污染源的纳管进行污水量、水质的检测,同时参考文献[5]和[6],以及长江流域类似区域污染源的水质指标,确定不同污染源污水量日变化曲线与水质指标,如图 5、表 1 所示。

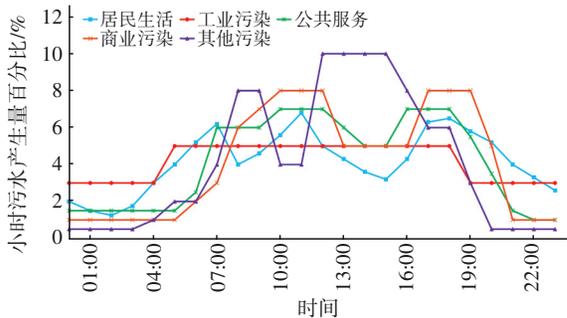


图 5 不同污染源污水量日变化曲线

Fig.5 Daily variation curves of sewage volume of different pollution sources

表 1 不同污染源的 COD 浓度

Tab.1 COD concentration of different pollution sources

项目	数量/个	污水量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	COD/ ($mg \cdot L^{-1}$)	
居民生活	居住用地	549	116 537	260
工业污染	工业用地	46	10 582	200
	物流用地	58	3 445	
公共服务	科研教育用地	28	3 540	240
	行政办公用地	74	5 574	
	医疗卫生用地	32	3 896	
	文化设施用地	4	151	
	体育用地	6	287	
	公用设施用地	115	2 505	
	交通设施用地	51	748	
商业污染	商务用地	2	135	220
	商业用地	200	19 402	
其他	绿地与广场用地	364	5 678	100
总计	—	1 533	172 597	—

③ 污水处理厂进水数据

分别收集第一、二、四污水处理厂 2017 年—2022 年的连续日进水量、相关水质指标数据,分析可知,各污水厂日均进水量分别约为 14.12×10^4 、 1.80×10^4 、 $6.05 \times 10^4 m^3$,进水 COD 均值分别为 131.00、72.18、102.56 mg/L。

④ 管网外水入侵

CZ 山泉水资源丰富,污水收集系统外水入侵主要包括上游山泉水汇入、地下水入渗、河水倒灌。根据中心城区用户用水量统计结果,日均用水总量约为 $21.5 \times 10^4 m^3$,按用水总量 85% 折算约为 $18.28 \times 10^4 m^3$,第一、二、四污水厂旱季日进水总量约为 $21.97 \times 10^4 m^3$,污水溢流排入河道的水量约为 $10 \times 10^4 m^3/d$ 。污水收集系统的水量平衡结果见图 6。

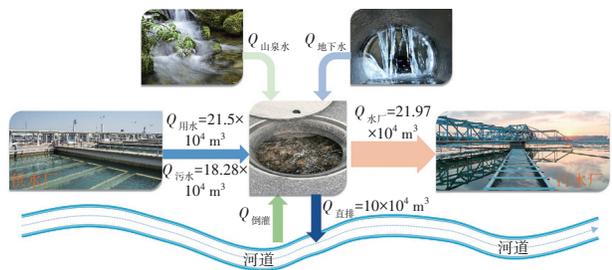


图 6 污水收集系统外水入渗分析结果

Fig.6 Analysis results of external water infiltration of sewage collection system

经计算,污水收集管网旱季外水入侵率约为:
 $(14.12+6.05+1.80+10-18.28)/(14.12+6.05+1.80+10)=42.8\%$ 。

2.3 建立模型

污水收集系统水动力、水质模型主要涉及的建模元素包括污水收集管网(污水管、合流管)、污染源、污水处理厂、污水排口及溢流口、入侵外水等。本研究结合区域污水收集管网数据、污染源类型及其水量水质数据、管网入渗资料,对污水收集系统进行概化。

① 污水收集管网概化:利用 ArcGIS 初步构建排水管网地理信息模型,按照统一标准对管网检查井、管道、出水口等进行数据整理,管网概化统计结果见表 2。通过 MIKE+与 ArcGIS 数据接口,快速导入 MIKE+模型,建立污水收集管网系统模型。

表 2 污水管网和合流管网系统概化信息

Tab.2 Statistical results of sewage pipe network and combined pipe network system

污水系统	检查井节点/个	管道/段	长度/km	排水口/个	污染源数量/个
第一、四污水处理厂	11 933	11 990	386	58	336
第二污水处理厂	1 799	1 778	66	28	1 197

② 污染源概化:将 ArcGIS 中概化的 1 533 个点状污染源导入建好的管网系统模型,不同污染源根据小区纳管连接情况,匹配关联到对应的市政污水井和合流井^[7]。污染源水量按照污水量变化曲线进行分配,污染源水质指标按均值输入。

③ 管网入渗概化:管网中主要外水入侵点位根据实测入渗水量输入,其余入渗量按照管网破损情况折算至各污水检查井与合流检查井。

基于以上管网、污染源、外水入渗等概化结果,建立案例区域污水收集系统模型。

2.4 参数验证

通过分析模型的模拟结果和实测结果之间的误差,验证模型参数的合理性和可靠性。本研究以污水厂进水 COD 浓度作为提质增效的评判指标。对进水量、COD 浓度的模拟值与实测值之间的相对误差(X_{ARE})进行评估,通常认为 $X_{ARE}<15\%$ 时,模型参数取值合理可信^[8-9]。水动力和水质参数验证的相对误差分析结果均在误差允许范围内(见表 3),表明模型参数准确、可靠。

表 3 污水收集系统模型参数验证结果

Tab.3 Parameter verification results of sewage collection system model

项目	第一污水处理厂		第四污水处理厂		第二污水处理厂	
	流量相对误差	水质相对误差	流量相对误差	水质相对误差	流量相对误差	水质相对误差
00:00:00	6.02	8.93	5.84	9.95	15.00	16.23
06:00:00	7.17	23.71	18.51	14.51	15.47	20.72
12:00:00	6.13	9.57	7.79	6.54	11.09	12.83
18:00:00	6.82	3.38	15.05	10.92	11.09	1.30
相对误差均值	6.54	11.40	11.80	10.48	13.17	12.77

3 模拟结果与分析

3.1 模拟方案设计

CZ 中心城区污水收集系统提质增效的主要工程措施有雨污分流改造、排口截污改造、破损管道修复。雨污分流改造主要是合流制管网改为分流制管网、管网混接点改造;排口截污改造指对旱季污水直排口或溢流口进行截污改造,保障旱季无污水直排、散排现象,实现旱季污水全收集;破损管网修复是指通过修复破损管道,减少地下水入渗量、河水倒灌量、上游山泉水汇入量。根据污水提质增效需求,重点针对旱季污水收集管网运行效能的提升设计模拟方案如图 7 所示。

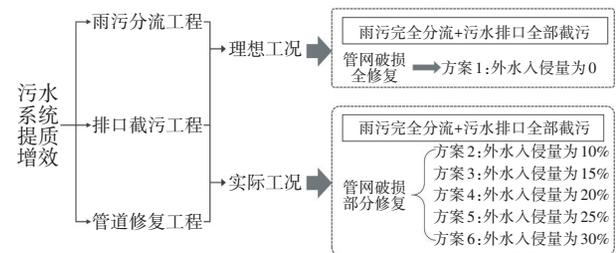


图 7 污水提质增效量化模拟方案

Fig.7 Quantitative simulation scheme of sewage quality and efficiency improvement

3.2 进厂污水量模拟分析

根据实际进水量数据可知,第一、四污水处理厂日进水量已超过其设计规模,基本上常年处于超负荷状态;第二污水处理厂日进水量未达到其设计规模,尚有近 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的负荷余量。对各污水提质增效方案进行量化模拟,污水厂进水量模拟结果如图 8 所示。

通过雨污分流、排口截污、管道修复改造措施,在保障旱季污水全收集、收集全处理,且无外水入

渗的理想情况下,第一、二、四污水处理厂日均进水量分别约为 10.65×10^4 、 0.95×10^4 、 2.90×10^4 m^3 。相比设计规模,理论上可分别腾出 1.35×10^4 、 3.05×10^4 、 3.10×10^4 m^3/d 的余量。若在此基础上对污水收集管网进行修复,外水入渗率可控制在 10%~30% 之间,则第一、二、四污水处理厂日均进水量分别为 11.34×10^4 ~ 12.65×10^4 、 1.13×10^4 ~ 1.49×10^4 、 3.52×10^4 ~ 5.42×10^4 m^3 。

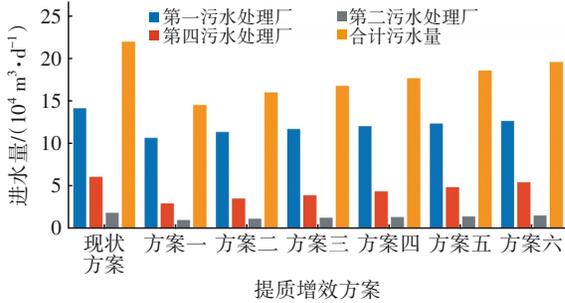


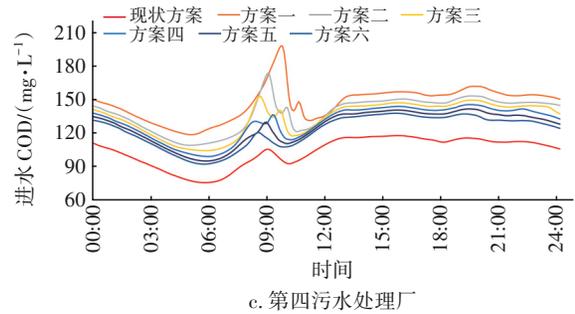
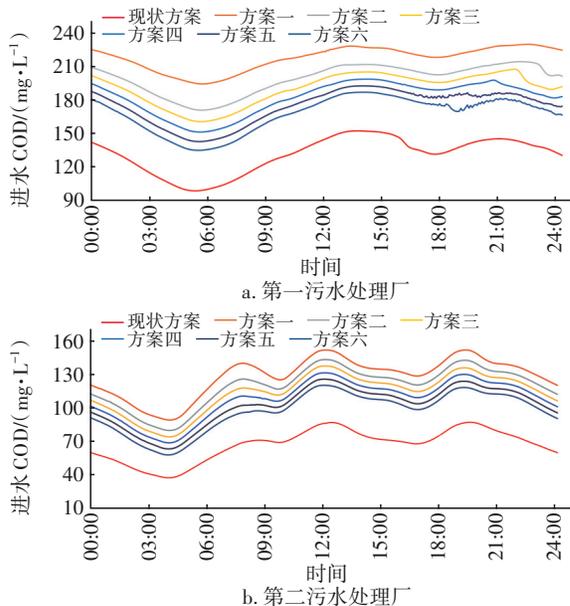
图 8 污水处理厂进水量量化模拟结果

Fig.8 Quantitative simulation results of influent quantity in sewage treatment plants

按照长江大保护污水收集管网修复工程实践经验,预估 CZ 中心城区管网修复后的入渗率可控制在 15%~20%,则第一、二、四污水处理厂日均进水量分别为 11.69×10^4 ~ 12.02×10^4 、 1.22×10^4 ~ 1.32×10^4 、 3.86×10^4 ~ 4.32×10^4 m^3 。

3.3 进厂水质模拟分析

在污水收集系统水量模拟的基础上,进一步分析不同污水提质增效方案中进水 COD 的变化,结果如图 9 所示。



c. 第四污水处理厂

图 9 第一、二、四污水处理厂进水 COD 浓度模拟结果

Fig.9 Simulation results of influent COD concentration in No.1, No.2 and No.4 sewage treatment plants

总体上各提质增效方案均对进水 COD 浓度有一定的提升效果。在旱季污水全收集、收集全处理、管网入渗问题彻底解决的理想情况下,预测第一、二、四污水处理厂进水 COD 的日均浓度可分别达到 227.85、129.10、148.55 mg/L 。相比现状情况,分别提升了 73.93%、78.86%、44.84%。若管网修复后的入渗率控制在 15%~20%,则第一、二、四污水处理厂进水 COD 的日均浓度分别为 200.65~209.45、114.09~120.09、135.28~139.53 mg/L 。参照现状污水厂进水水质的可生化性(第一、二、四污水处理厂分别为 0.38、0.38、0.39),预计污水提质增效方案实施后,第一、二、四污水处理厂进水 BOD₅ 可分别达到 78、44、54 mg/L 。

结合各提质增效改造方案下第一、二、四污水处理厂进水 COD 情况,在实现旱季污水全收集、收集全处理的前提下,分析各污水处理厂进水 COD 浓度随污水收集管网外水入渗率的函数表达关系,结果如图 10 所示。在后续 CZ 中心城区进行污水提质增效方案改造实践中,通过该函数表达关系,可初步估算各污水处理厂进水 COD 的提升效果。

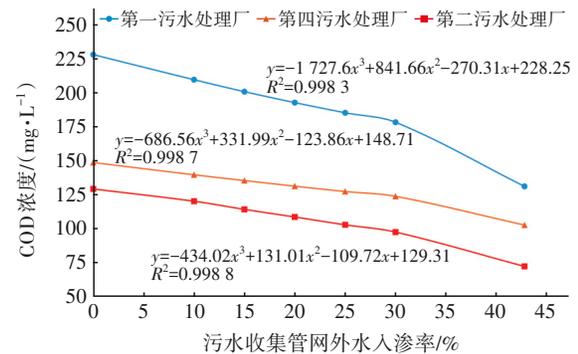


图 10 污水处理厂进水 COD 浓度变化趋势预测结果

Fig.10 Prediction results of influent COD concentration in sewage treatment plants

4 结论与建议

① 基于城市水系统模型 MIKE+形成了一套构建城市污水收集系统水动力、水质量化模拟分析的技术方法。通过选取典型城市污水收集系统提质增效工程措施进行模拟分析,证实了该技术方法具备一定的可复制推广性,可为类似的量化分析提供思路。

② 结合长江大保护污水提质增效工程实践经验,并对CZ中心城区污水收集系统的雨污分流改造、排口截污改造、破损管道修复方案进行量化模拟分析发现,在实现旱季污水全收集、收集全处理的基础上,修复破损污水收集管道,挤出上游山泉水、中下游入渗地下水、沿河管网倒灌河水等入侵水,将是CZ中心城区污水提质增效工作的重点。

建议下阶段从“末端进厂-中途管网-源头污染源”筛选关键节点,开展持续的污水量、水质检测。并基于检测数据结果,溯源式诊断污水收集系统存在的核心问题,有的放矢开展污水提质增效工作,提升污水处理厂进水污染物浓度,实现节能降耗、降本增效。

参考文献:

- [1] WANG J, LIU G H, WANG J Y, *et al.* Current status, existent problems, and coping strategy of urban drainage pipeline network in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(32): 43035-43049.
- [2] 周小国,惠二青,彭寿海,等. 长江沿线污水处理厂进水 BOD₅ 浓度与管网运营调查分析[J]. *给水排水*, 2021, 47(S1): 129-133.
- ZHOU Xiaoguo, HUI Erqing, PENG Shouhai, *et al.* Investigation and analysis of BOD₅ concentration for sewage plants and pipe network operation along the Yangtze River [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(S1): 129-133(in Chinese).
- [3] 徐祖信,张竞艺,徐晋,等. 城市排水系统提质增效关键技术研究——以马鞍山市为例[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 348-355.
- XU Zuxin, ZHANG Jingyi, XU Jin, *et al.* Study on key technologies for improving quality and efficiency of urban drainage system: a case of Ma'anshan City [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2): 348-355(in Chinese).

- [4] 邢玉坤,曹秀芹,柳婷,等. 我国城市排水系统现状、问题与发展建议[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(10): 19-23.
- XING Yukun, CAO Xiuqin, LIU Ting, *et al.* Current status, problems and development suggestions of urban drainage system in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(10): 19-23(in Chinese).
- [5] 刘春霞,王琰,沈磊,等. 城市典型用户四季用水模式变化规律的确定及分析[J]. *供水技术*, 2015, 9(4): 49-52.
- LIU Chunxia, WANG Yan, SHEN Lei, *et al.* Determination and analysis of variation regularity of water use model for urban typical users in four seasons [J]. *Water Technology*, 2015, 9(4): 49-52(in Chinese).
- [6] 程桂,李翠梅,郜阔. 城市行业用水量变化与用水模式实例研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2016, 33(1): 49-54.
- CHENG Gui, LI Cuimei, GAO Kuo. A case study of water consumption change and water-use pattern for city industries [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2016, 33(1): 49-54(in Chinese).
- [7] LIAO Z L, ZHI G Z, ZHOU Y W, *et al.* To analyze the urban water pollution discharge system using the tracking and tracing approach [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(14): 1080.
- [8] XIE J Q, CHEN H, LIAO Z L, *et al.* An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 143-155.
- [9] 谢家强,廖振良,顾献勇. 基于 MIKE URBAN 的中心城区内涝预测与评估——以上海市霍山-惠民系统为例[J]. *能源环境保护*, 2016, 30(5): 44-49.
- XIE Jiaqiang, LIAO Zhenliang, GU Xianyong. Prediction and evaluation of waterlogging in highly urbanized areas based on MIKE URBAN: demonstrated on the example of Huoshan-Huimin drainage system in Shanghai [J]. *Energy Environmental Protection*, 2016, 30(5): 44-49(in Chinese).

作者简介:谢家强(1990-),男,四川简阳人,硕士,工程师,主要从事水环境综合治理、城市水系统模拟工作。

E-mail: jiaqiang_xie06293@163.com

收稿日期:2022-02-08

修回日期:2022-05-10

(编辑:任莹莹)